

УДК 621.7

Я.Н. Гарашенко, канд. техн. наук., Харьков, Украина

## **ОЦЕНКА ИСХОДНОЙ 3D-МОДЕЛИ НА ПРИСПОСОБЛЕННОСТЬ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ РАЦИОНАЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИИ ИЗДЕЛИЯ ПРИ ПОСЛОЙНОМ ПОСТРОЕНИИ**

*Розглянуто можливість оцінки технологічності конструкції виробу на основі статистичного аналізу розподілу площі граней при сферичному відображенні вихідної триангуляційної моделі. Запропоновано показник, що дозволяє при відпрацюванні конструкції на технологічність кількісно оцінювати можливість визначення раціональної орієнтації виробу в робочому просторі установки пошарової побудови.*

*Ключові слова: статистичний аналіз, триангуляційна модель, раціональна орієнтація виробу.*

*Рассмотрена возможность оценки технологичности конструкции изделия на основе статистического анализа распределения площади граней при сферическом отображении исходной триангуляционной модели. Предложен показатель, позволяющий при отработке конструкции на технологичность количественно оценивать возможность определения рациональной ориентации изделия в рабочем пространстве установки послойного построения.*

*Ключевые слова: статистический анализ, триангуляционная модель, рациональная ориентация изделия.*

*The possibility of evaluating workability of industrial product on the basis of a statistical analysis of the distribution of the area of faces obtained by spherical mapping of original triangulation model is considered. An index is proposed that allows to assess the possibility of determining the rational orientation of a product in the working space of a layer-by-layer installation when the design is tested for the workability.*

*Keywords: statistical analysis, triangulation model, rational orientation*

### *Постановка проблеми*

Оценка конструкции изделия на приспособленность к определению его рациональной ориентации в рабочей области построения установки аддитивных технологий на этапах конструкционной и технологической подготовки представляет интерес для обеспечения эффективности процессов послойного изготовления [1].

Определение рациональной ориентации изделия в рабочей области построения установки является одной из первых задач, выполняемой при технологической подготовке так как определяет технологические ограничения по обеспечению требований на поверхности изделия. Задачу выбора рациональной ориентации изделия, как правило, решают на основе множества критериев [2, 3], что усложняет ее решение.

### *Анализ литературы*

Выбор варианта ориентации осуществляется с учетом наиболее важных

факторов, таких как минимизация времени построения (количество слоев) и минимизация вспомогательных структур (для методов изготовления SLA, SLM и FDM). Так как ориентация влияет на множество факторов, то ее выбор при построении выполняют на основе следующих из них:

- характеристики качества поверхности, время построения, сложность и объем поддерживающих структур [4, 5];
- количество слоев формообразования материала [6, 7];
- высота изделия по координатной оси  $Z$  [8, 9];
- площадь поверхностей граней соприкасающихся с поддерживающими структурами (площадь граней триангуляционной модели с коэффициентом нормали по оси  $Z - N_z < 0$ ) [8];
- погрешность поверхности (площадь граней с нормальными не перпендикулярных и не параллельных оси  $Z$ , т.е.  $|N_z| \neq 1$  и  $N_z \neq 0$  [6, 7], площадь граней с нормальными  $|N_z| = 1$  и  $N_z = 0$  [10], разница между объемами исходной модели и готового изделия [8]);
- прочность изделия [8].

Несмотря на большое количество работ [2-10] по решению данной задачи отсутствует методическая основа для оценки технологичности конструкции изделия применительно к определению рациональной ориентации. Поэтому для отработки конструкции изделия на приспособленность к определению рациональной ориентации необходимо разработать специальную оценку учитывающей особенности послойного построения.

В качестве наиболее представительного исследуемого признака триангуляционной 3D-модели с учетом работ [5, 11] для определения рациональной ориентации был выбран угол наклона нормалей граней относительно вектора направления построения (координатной оси  $Z$ ). Данный исследуемый признак является наиболее значимым из геометрических свойств 3D-модели, т.к. определяет шероховатость и погрешности формообразования поверхностей изделия. Поверхности с отрицательным углом наклона нормалей относительно оси  $Z$  определяют конструкцию поддерживающих структур и соответственно трудоемкость процессов постобработки для их удаления. При формообразовании с переменным шагом построения также учитывается угол наклона нормалей граней.

Угол наклона грани относительно вектора направления построения рассчитывается по коэффициентам единичного вектора нормали  $N_x, N_y, N_z$ . Величины коэффициентов  $N_x, N_y, N_z$ , как правило, представлены в исходном STL-файле. В противном случае коэффициенты  $N_x, N_y, N_z$  определяются по известным зависимостям [12] на основе координат вершин треугольной грани.

*Цель статьи* – рассмотреть возможности оценки технологичности конструкции изделия применительно к задаче определения рациональной его

ориентации в рабочей области построения установки аддитивных технологий.

#### *Изложение основного материала*

Исследование выполнялось с использованием подсистемы цветовой визуализации триангуляционной модели изделия, предназначенной для отработки его конструкции при решении задач технологической подготовки. Данная подсистема входит в систему технологической подготовки материализации сложных изделий аддитивными технологиями, разработанной на кафедре "Интегрированные технологии машиностроения" им. М.Ф. Семко НТУ "ХПИ". Данная система позволяет выполнять оценку технологичности конструкции изделия и анализ эффективности использования аддитивных технологий при его изготовлении.

При разработке подсистемы цветовой визуализации триангуляционной модели изделия решались следующие основные задачи:

- оценка корректности и рациональности триангуляции CAD-модели;
- отработка конструкции изделия на технологичность при использовании аддитивных технологий для его получения;
- визуальная оценка возможности определения рациональной ориентации изделия в рабочей области построения.

Экранная форма подсистемы цветовой визуализации представлена на рис. 1. Система позволяет визуализировать модель по настраиваемой цветовой шкале и выполнять статистический анализ распределения величин исследуемого признака.

Разработанная подсистема представляет пользователю следующие основные возможности задания параметров и режимов работы с последующей визуализацией результатов:

- автоматическое формирование цветовой шкалы при задании количества интервалов и цвета для первого и последнего интервала;
- редактирование интервалов или выборочное их удаление в базе данных цветовой шкалы соответствия значениям исследуемого признака;
- редактирование цвета для каждого интервала значений в отдельности с использованием диалогового окна выбора цвета;
- сохранение цветной модели в файл формата PLY, AMF или для дополнительного анализа в виде таблицы данных в формате XLS (или в формате TXT при отсутствии приложения MS Excel);
- статистический анализ и построение гистограмм распределения исследуемых признаков по количеству и площади треугольных граней;
- запись результатов расчетов в общую таблицу для сравнительного анализа;
- определение основных статистических характеристик (12 параметров);
- сохранение результатов статистического анализа в файл XLS-формата для дальнейшего анализа с использованием стороннего программного обеспечения;

- вывод формы визуализации результатов анализа в виде плотности или интегральной функции вероятности.

Применительно к послойным методам аддитивных технологий наибольшие шероховатость и отклонения от правильной формы поверхностей наблюдаются для граней, имеющих угол между векторами их нормалей и направления построения (координатная ось  $Z$ ) в следующих условно выделенных интервалах значений  $\alpha_{NZ} \in (0^\circ, 45^\circ)$  и  $\alpha_{NZ} \in (135^\circ, 180^\circ)$  [13]. Высокая точность достигается для поверхностей, получаемых при обводе лазерным лучом контура в плоскости слоя  $XY$ , т. е. наименьшие отклонения формы характерны для поверхностей имеющих  $\alpha_{NZ} \in (45^\circ, 135^\circ)$ . Минимальная величина отклонений будет при  $\alpha_{NZ} = 90^\circ$ .

Для ряда методов аддитивных технологий (SLA, SLM, FDM и т. д.) "свисающие" поверхности требуют создания поддерживающих структур [14]. К таким поверхностям относятся грани с  $\alpha_{NZ} \in (\alpha_{NZ\_min}, 180^\circ)$ , где  $\alpha_{NZ\_min}$  – минимальное значение угла наклона вектора нормали граней относительно направления построения требующих поддерживающих структур. В зависимости от метода изготовления и исходного материала для создаваемого изделия  $\alpha_{NZ\_min} = 130^\circ \div 145^\circ$  [14].

При технологической подготовке цветовая визуализация модели изделия по коэффициенту  $N_Z$  (в подсистеме, представленной на рис. 1) предлагает необходимую информацию для принятия решений по созданию опорных структур и постобработке благодаря отображению областей с повышенными отклонениями формы и требующих поддержки. Но такая визуализация имеет явные ограничения для изделий, имеющих большое количество сложных по форме поверхностей. Поэтому для снятия ограничений, накладываемых особенностями исследуемой конструкции, предлагается выполнять отображение на сферу модели изделия (цветовая шкала соответствия исследуемому признаку - суммарной площади граней). Условием отображения на сферу является попадание значений углов наклона векторов нормалей граней модели изделия в сферической системе координат в область значений определенной грани триангуляционной модели сферы.

Переход от коэффициентов  $N_x$ ,  $N_y$ ,  $N_z$  единичного вектора нормали грани модели изделия к углам  $\theta$ ,  $\varphi$  в сферической системе координат ( $\theta$ ,  $\varphi$  — зенитный и азимутальный углы соответственно) выполняется по следующим зависимостям [12]:

$$\theta = \arctg \left( \frac{\sqrt{N_x^2 + N_y^2}}{N_z} \right), \quad \varphi = \arctg \left( \frac{N_y}{N_x} \right).$$

Особенность триангуляционной модели сферы получаемой в CAD-системах — это описание ребрами граней линий "параллелей" и "меридианов" с двумя полюсами. Такая особенность является достоинством при определении интервалов углов наклона нормали  $\theta$  и  $\varphi$  по каждой грани триангуляционной модели сферы.

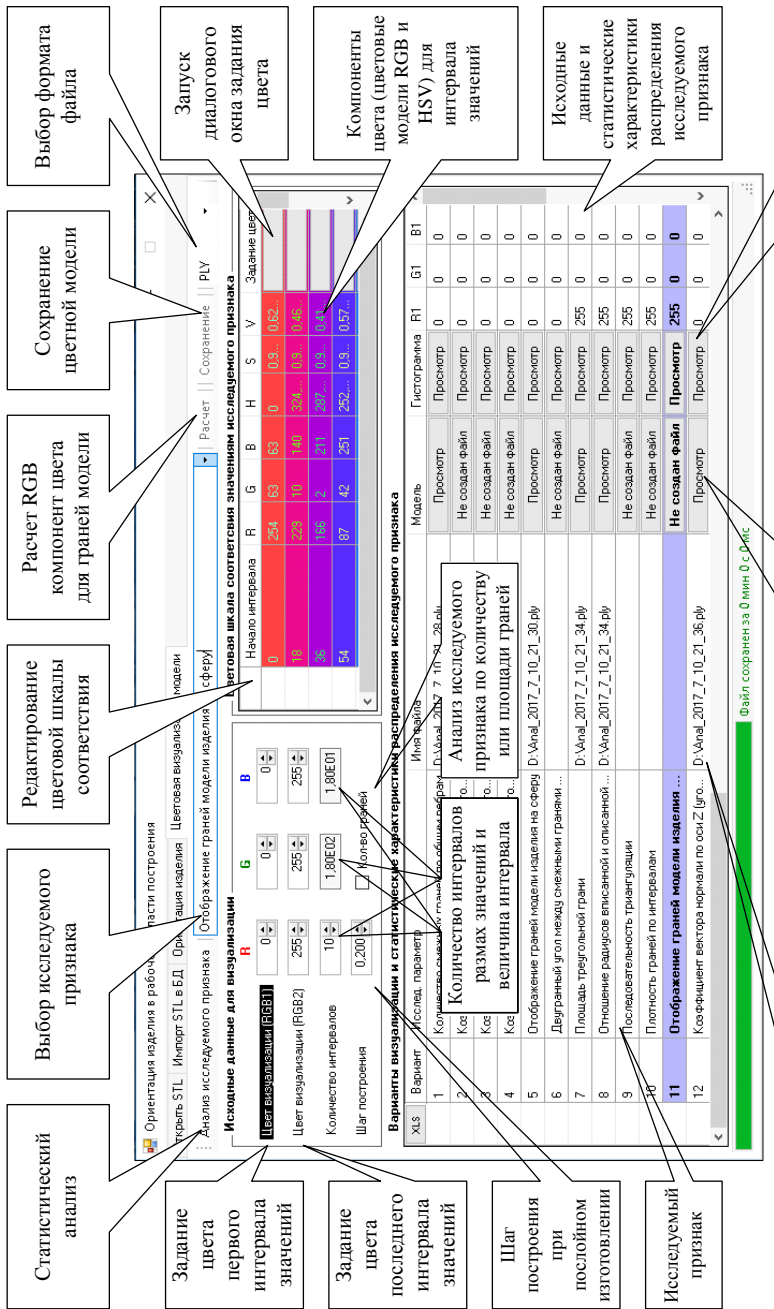


Рисунок 1 – Подсистема цветовой визуализации триангуляционной 3D-модели изделия

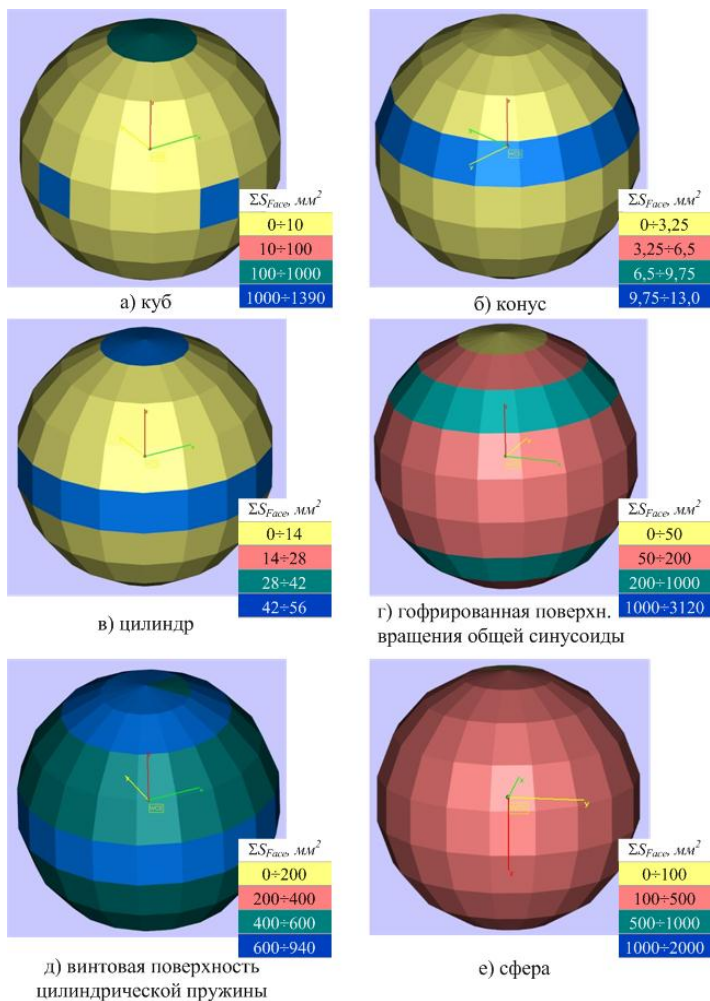


Рисунок 2 – Цветовая визуализация по суммарной площади граней отображения на триангуляционную модель сферы тестовых моделей

Границы интервалов значений углов  $\theta$ ,  $\varphi$  для  $i$ -й грани триангуляционной модели сферы, определяются минимальным и максимальным значениями координат вершин грани в сферической системе

координат. Координаты  $\theta$ ,  $\varphi$  вершины грани для триангуляционной модели сферы с началом системы координат в ее центре определяются по следующим зависимостям [12]:

$$\theta_j = \arctg \left( \frac{\sqrt{x_{v(j)}^2 + y_{v(j)}^2}}{z_{v(j)}} \right), \quad \varphi_j = \arctg \left( \frac{y_{v(j)}}{x_{v(j)}} \right),$$

где  $x_{v(j)}$ ,  $y_{v(j)}$ ,  $z_{v(j)}$  – координаты  $j$ -й вершины треугольной грани сферы в декартовой системе координат.

Представленные примеры визуализации для тестовых моделей простых геометрических форм (поверхностей) на рис. 2 и промышленных изделий на рис. 3 – 4 показывают достаточно высокий уровень информативности для определения рациональной ориентации. Модель сферы с цветовым отображением площади граней триангуляционной 3D-модели изделия достаточно проста в использовании. Задача определения рациональной ориентации изделия в рабочей области послойного построения сводится к ориентации поверхности с большей площадью таким образом, чтобы нормали их граней имели минимальное отклонение от плоскости построения ХУ. В этом случае обеспечивается минимальная погрешность формообразования поверхностей изделия при послойном построении [2-10].

Предложенный подход визуализации также демонстрирует возможность оценки пригодности конструкции (3D-модели) для рациональной ориентации изделия в рабочей области построения и соответственно технологичности его изготовления аддитивными технологиями.

Важным является определение рациональной степени детализации (количества интервалов значений углов наклона нормалей) отображения на сферу. Увеличение количества граней триангуляционной модели сферы позволяет более информативно оценивать сложность конструкции (геометрическую сложность 3D-модели изделия). Но при этом интервалы значений углов наклона нормалей граней модели изделия, определяющих поверхности с низкой и высокой точностью построения, нуждающихся в поддерживающих структурах достаточно широкие. Исходя из практики использования аддитивных технологий составляют  $20^\circ \div 45^\circ$ . Поэтому для оценки технологичности изделия, применительно к задаче ориентации изделия, предпочтительнее использовать сферу для отображения с интервалом значений углов  $20^\circ \div 30^\circ$ .

В дополнение к визуальному анализу модели рассмотрена возможность количественной оценки технологичности изделия по данным распределения площади граней модели изделия по интервалам отображения на модель сферы.

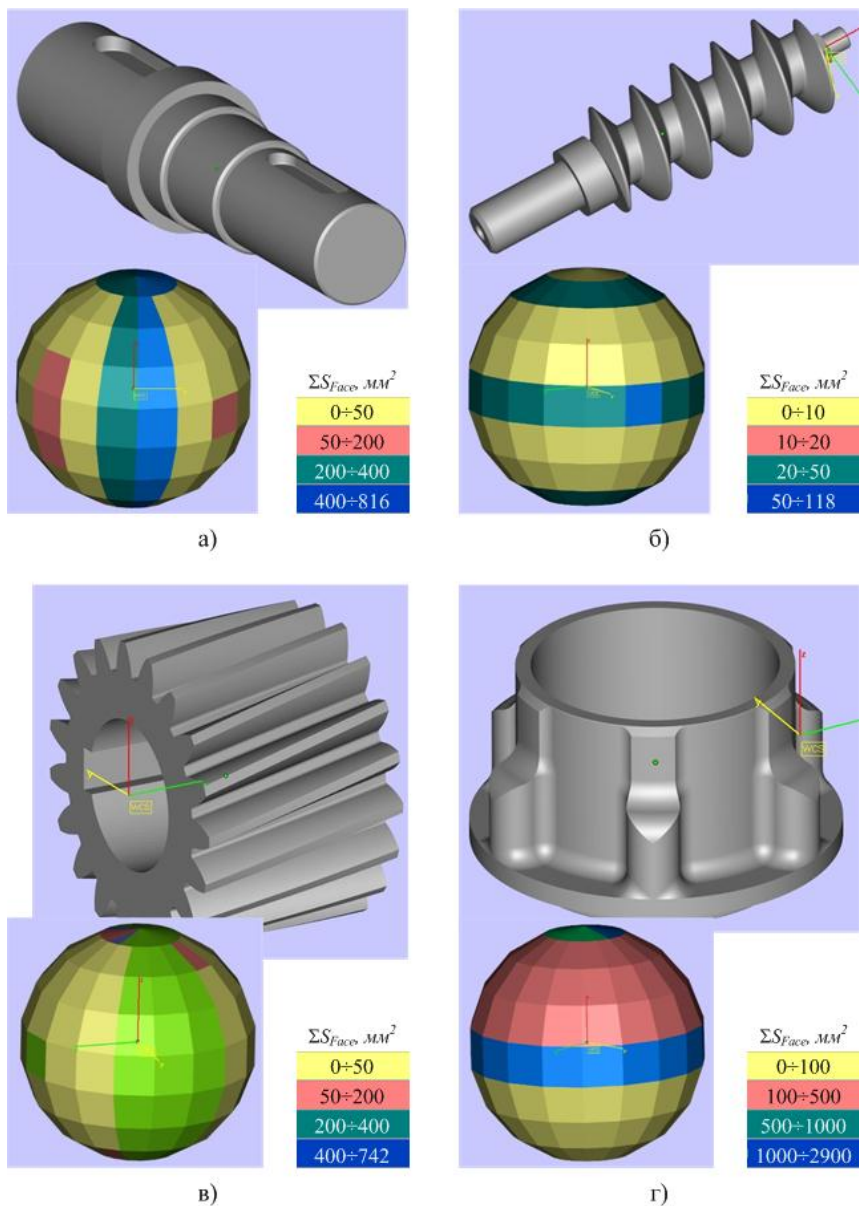


Рисунок 3 – Цветовая визуализация по суммарной площади граней отображением на триангуляционную модель сферы моделей промышленных изделий



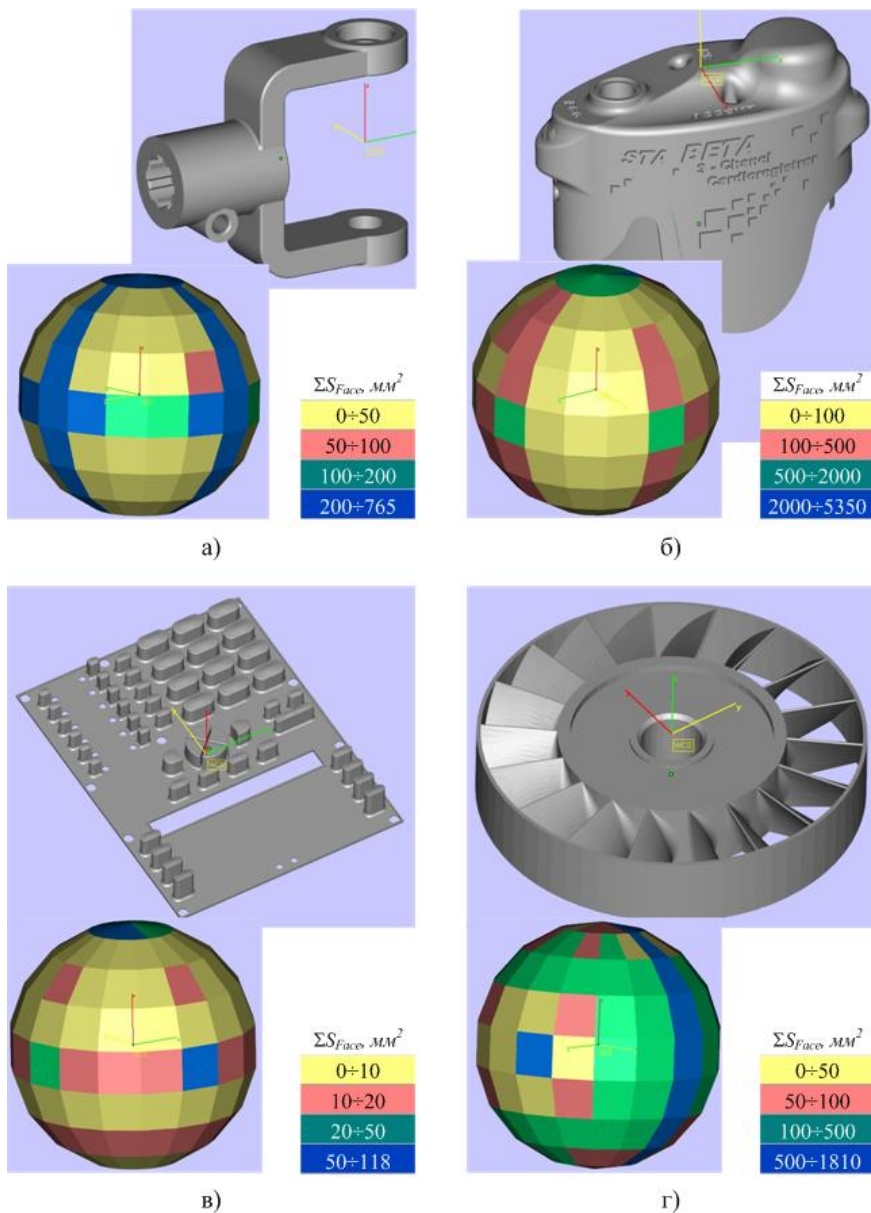


Рисунок 4 - Цветовая визуализация по суммарной площади граней отображением на триангуляционную модель сферы моделей промышленных изделий

Анализ простых тестовых моделей, представленных на рис. 2, выполнялся при отображении их на триангуляционную модель сферы с интервалами углов  $\Delta\theta$  и  $\Delta\varphi = 20^\circ$ . Из результатов анализа выявлено, что для тестируемых моделей с большими отклонениями от равномерного распределения площади граней  $S_i$  на отображенной сфере характерно более простое решение задачи по их рациональной ориентации. Примерами, для подтверждения могут служить модели сферы и цилиндра вращения. Сфера имеет распределение  $S_i$  с минимальными отклонениями от равномерного закона, при этом задача рациональной ее ориентации не имеет решения. Цилиндр вращения имеет наибольшие отклонения от равномерного распределения  $S_i$  с нормальными, расположенными в одной плоскости. При этом для цилиндра такая задача имеет решение с однозначным определением углов наклона, задающих ориентацию оси цилиндра параллельно оси  $Z$  (вектору направления построения).

Получаемое неравномерное отображение модели сферы на сферу объясняется невозможностью идеального отображения на триангуляционную модель.

Наиболее целесообразным представляется оценка приспособленности конструкции к ориентации через определение отклонения от равномерного распределения площадей граней отображенных на сферу. Модель сферы является наименее приспособленной для решения данной задачи. Поэтому предложена гипотеза о том, что показателем эффективности рациональной ориентации изделия (для отработки конструкции) может служить коэффициент концентрации плотности распределения  $S_i$ , характеризующим различие двух плотностей распределения случайной величины (для моделей изделия и сферы) [15]:

$$K_{GO} = \frac{1}{2} \sum_{i,j}^{n,m} |D_{ij} - d_{ij}|, \quad (1)$$

где  $n, m$  – число интервалов для углов  $\theta \in [0, 180]$  и  $\varphi \in [0, 360]$  (в сферической системе координат) наклона векторов нормалей треугольных граней модели соответственно,  $n = 6 \div 9$ ,  $m = 2n$ ;

$D_{ij}, d_{ij}$  – относительная площадь граней, попадающих в  $ij$ -и интервал значений углов  $\theta$  и  $\varphi$  наклона векторов нормалей для модели изделия и сферы соответственно,  $d_{ij} = 1/n_{tr\_sphere}$  (для случая равномерного распределения величины исследуемого признака);

$n_{tr\_sphere}$  – количество треугольников сферы для отображения модели изделия.

Проверка гипотезы выполнялась по результатам расчета коэффициента  $K_{GO}$  для тестовых моделей (рис. 2), отображенных на триангуляционную модель сферы ( $n = 6$ ,  $m = 12$  соответственно  $\Delta\theta = \Delta\varphi = 30^\circ$ ). Данные расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Показатели приспособленности тестовых моделей геометрических тел для определения рациональной ориентации

Тестовая модель	$K_{GO}$
Куб	0.733
Конус	0.700
Круговой цилиндр	0.600
Гофрированная поверхность вращения общей синусоиды	0.353
Прямой геликоид	0.750
Винтовая поверхность цилиндрической пружины	0.285
Сфера	0.107
Открытый круговой тор	0.242
Гиперболический параболоид	0.733

Сравнительный анализ полученных коэффициентов  $K_{GO}$  (табл. 1) на примере тестовых моделей простейших геометрических тел позволяет подтвердить выдвинутую гипотезу. Например куб, конус и цилиндр имеют очевидное решение задачи определения рациональной ориентации в рабочей области построения с наибольшей эффективностью из тестовых моделей. При этом значения  $K_{GO}$  для этих моделей получены сравнительно большие по величине. Наименее приспособленные для рациональной ориентации модели поверхности пружины, сферы и тора, а соответственно для них получено минимальные значения коэффициента  $K_{GO}$ .

Дальнейшая проверка гипотезы о возможности оценки приспособленности модели изделия по зависимости (1) выполнялась на примере моделей промышленных изделий, приведенных на рис. 3-4. Результаты расчета коэффициента  $K_{GO}$  по данным отображения на сферу моделей изделий представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Показатели приспособленности тестовых моделей промышленных изделий для определения рациональной ориентации

Тестовая модель (габаритные размеры, мм)	$K_{GO}$
Вал (64 × 64 × 138)	0.519
Шнек (40 × 40 × 144)	0.512
Шестерня (86 × 86 × 60)	0.513
Корпус (125 × 210 × 210)	0.531
Карданный вал (148 × 50 × 124)	0.477
Крышка (84 × 101 × 43)	0.480
Панель (152 × 196 × 20)	0.489
Вентилятор (26 × 92 × 92)	0.307

Сравнительный анализ коэффициентов  $K_{GO}$  (табл. 2) на примере моделей изделий также подтвердил выдвинутую гипотезу. С уменьшением величины коэффициента  $K_{GO}$  снижается эффективность решения задачи определения рациональной ориентации изделия в области построения. Оценка по данному

коэффициенту оправдана для случаев определения рациональной ориентации по критериям, зависящим от наклона векторов нормалей граней модели. К таким критериям оптимизации относятся статистические характеристики шероховатости поверхности и отклонений от правильной формы поверхностей.

Исходя из анализа результатов расчетов и практики изготовления рассмотренных изделий для моделей с коэффициентом  $K_{GO}$  ниже среднего показателя следует выбирать следующие критерии оптимизации для определения ориентации изделия: высота загрузки изделий на рабочей платформе, количество слоев или время построения. При больших значениях коэффициента  $K_{GO}$  следует рассматривать многокритериальную оптимизацию.

### *Выводы*

Предложенный относительный показатель  $K_{GO}$  для оценки эффективности определения рациональной ориентации изделия по критериям качества полученных поверхностей позволяет с достаточно высокой информативностью оценивать технологичность (приспособленность конструкции) для его изготовления аддитивными технологиями.

Результаты работы создают методологическую основу для последующего углубленного изучения триангуляционных моделей при оценке технологичности изделий и выборе рационального метода материализации.

**Список использованных источников:** 1. *Esa Hietikko*, 2014. Design for Additive Manufacturing - DFAM. The International Journal Of Engineering And Science (IJES). Volume 3. Issue 12. December 2014. P. 14-19. ISSN (e): 2319-1813 ISSN (p): 2319-1805. 2. *Byun H.S., Lee K.H.* Determination of optimal build direction in rapid prototyping with variable slicing. Int J Adv Manuf Technol (2006) 28: p. 307–313. DOI: 10.1007/s00170-004-2355-5. 3. *Canellidis V, Giannatsis J, Dedoussis V.* Genetic-algorithm-based multi-objective optimization of the build orientation in stereolithography. Int J Adv Manuf Technol (2009) 45: 714–730. DOI: 10.1007/s00170-009-2006-y. 4. *Lan, P.-T., Chou, S.-Y., Chen, L.-L and Gemmill, D.,* Determining fabrication orientations for rapid prototyping with stereolithography apparatus, Computer Aided Design, Vol. 29 No. 1, 1997, pp. 53-62. 5. *Singhal S.K.* Optimum part deposition orientation in stereolithography / *S.K. Singhal, A.P. Pandey, P.M. Pandey, A.K. Nagpal* // Computer-Aided Design & Applications. – 2005. – Vol. 2. – Nos. 1-4. – P. 319-328. 6. *Marsan, A. and Dutta, D.,* A survey of process planning techniques for layered manufacturing, Proceedings of the 1997 ASME Design Automation Conference, Sacramento, CA, September 1997. 7. *Bablani, M. and Bagchi, A.* Quantification of errors in rapid prototyping processes, and determination of preferred orientation of parts, Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of the SME, Vol. XXIII, SME, Houghton, MI, May 1995, pp. 319-324. 8. *Thompson, D.C. and Crawford, R.H.* Optimizing part quality with orientation, in Marcus, H.L. et al. (Eds), Solid Freeform Fabrication Symposium 1995, University of Texas, Austin, August 1995. 9. *Витязев Ю.Б.* Расширение технологических возможностей ускоренного формообразования способом стереолитографии: Дис... канд. техн. наук: 05.02.08. – Харьков, 2004. – 228 с. 10. Пат. 54398U УКРАЇНА, МПК B29C 35/08, B29C 41/02, G06F 17/50, G06F 19/00. Спосіб пошарової побудови виробів на базі вихідної триангуляційної 3D моделі / *Абдураймов Л.Н., Чернишов С.І., Доброскок В.Л., Витязев Ю.Б.*; заявник і патентовласник Нац. техн. ун-т "Харківський політехн. ін-т". – № u201004548; Заявл. 19.04.2010; Опубл. 10.11.2010, Бюл. № 21. 11. *Абдураймов Л.Н.*

Повышение эффективности интегрированных технологий послойного выращивания изделий путем морфологического анализа их 3D образа на этапе подготовки к материализации: Дис. канд... техн. наук: 05.02.08. – Харьков: НТУ "Харк. пол. ин-т.", 2012. – 264 с. **12.** *Выгодский М.Я.* Справочник по высшей математике. – М.: АСТ: Астрель, 2006. – 991 с. **13.** *Daekeon Ahn, Hochan Kim, Seokhee Lee*, Fabrication direction optimization to minimize post-machining in layered manufacturing, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 47, Issues 3–4, March 2007, Pages 593-606, ISSN 0890-6955, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.05.004>. **14.** *M. Kumke, H. Watschke, and T. Viotor*. A new methodological framework for design for additive manufacturing. *Virtual And Physical Prototyping* Vol. 11, Iss. 1, 2016, pp. 3-19, <http://dx.doi.org/10.1080/17452759.2016.1139377>. **15.** *Подгорный А.З., Мылашко О.Г., Киршо С.М., Шилофост Н.М.* Статистика: Учебное пособие для иностранных студентов. – Одесса: Атлант, 2012. – 195 с.

**Bibliography (transliterated):** **1.** *Esa Hietikko*, 2014. Design for Additive Manufacturing - DFAM. The International Journal Of Engineering And Science (IJES). Volume 3. Issue 12. December 2014. P. 14-19. ISSN (e): 2319-1813 ISSN (p): 2319-1805. **2.** *Byun H.S., Lee K.H.* Determination of optimal build direction in rapid prototyping with variable slicing. *Int J Adv Manuf Technol* (2006) 28: p. 307–313. DOI: 10.1007/s00170-004-2355-5. **3.** *Canellidis V, Giannatsis J, Dedoussis V.* Genetic-algorithm-based multi-objective optimization of the build orientation in stereolithography. *Int J Adv Manuf Technol* (2009) 45: 714–730. DOI: 10.1007/s00170-009-2006-y. **4.** *Lan, P.-T., Chou, S.-Y., Chen, L.-L and Gemmill, D.*, Determining fabrication orientations for rapid prototyping with stereolithography apparatus, *Computer Aided Design*, Vol. 29 No. 1, 1997, pp. 53-62. **5.** *Singhal S.K.* Optimum part deposition orientation in stereolithography / *S.K. Singhal, A.P. Pandey, P.M. Pandey, A.K. Nagpal // Computer-Aided Design & Applications*. – 2005. – Vol. 2. – Nos. 1-4. – P. 319-328. **6.** *Marsan, A. and Dutta, D.*, A survey of process planning techniques for layered manufacturing, *Proceedings of the 1997 ASME Design Automation Conference*, Sacramento, CA, September 1997. **7.** *Bablani, M. and Bagchi, A.* Quantification of errors in rapid prototyping processes, and determination of preferred orientation of parts, *Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of the SME*, Vol. XXIII, SME, Houghton, MI, May 1995, pp. 319-324. **8.** *Thompson, D.C. and Crawford, R.H.* Optimizing part quality with orientation, in *Marcus, H.L. et al. (Eds), Solid Freeform Fabrication Symposium 1995*, University of Texas, Austin, August 1995. **9.** *Vitjazez Ju.B.* Rasshirenie tehnologicheskikh vozmozhnostej uskorennoho formoobrazovaniya sposobom stereolitografii: Dis... kand. tehn. nauk: 05.02.08. – Har'kov, 2004. - 228 s. **10.** *Pat. 54398U UKRAYiNA, MPK B29C 35/08, B29C 41/02, G06F 17/50, G06F 19/00.* Sposib posharovoyi pobudovy vyrobiv na bazi vykhidnoyi trianhulyatsiynoyi 3D modeli / *Abdurajimov L.N., Chernyshov S.I., Dobroskok V.L., Vityazyev Yu.B.;* zayavnyk i patentovlasnyk Nats. tekhn. un-t "Kharkivs'kyi politekhn. in-t". – № u201004548; Zayavl. 19.04.2010; Opubl. 10.11.2010, Byul. № 21. **11.** *Abdurajimov L.N.* Povyshenie jeffektivnosti integrirovannyh tehnologij poslojnoho vyrashhivaniya izdelij putem morfologicheskogo analiza ih 3D obraza na jetape podgotovki k materializacii: Dis. kand... tehn. nauk: 05.02.08. – Har'kov: NTU "Hark. pol. in-t.", 2012. – 264 s. **12.** *Vygodskij M.Ja.* Spravochnik po vysshej matematike. – M.: AST: Astrel', 2006. – 991 s. **13.** *Daekeon Ahn, Hochan Kim, Seokhee Lee*, Fabrication direction optimization to minimize post-machining in layered manufacturing, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 47, Issues 3–4, March 2007, Pages 593-606, ISSN 0890-6955, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.05.004>. **14.** *M. Kumke, H. Watschke, and T. Viotor*. A new methodological framework for design for additive manufacturing. *Virtual And Physical Prototyping* Vol. 11, Iss. 1, 2016, pp. 3-19, <http://dx.doi.org/10.1080/17452759.2016.1139377>. **15.** *Podgornij A.Z., Mylashko O.G., Kirsho S.M., Shilofost N.M.* Statistika: Uchebnoe posobie dlja inostrannyh studentov. – Odessa: Atlant, 2012. – 195 s.